



TITLE:

Generation of heralded multi-photon
parallel state for realizing a large-scale
photonic quantum circuit(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Kiyohara, Takayuki

CITATION:

Kiyohara, Takayuki. Generation of heralded multi-photon parallel state for realizing a large-scale photonic quantum circuit. 京都大学, 2020, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2020-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22448>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により本文は2021-01-01に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	清 原 孝 行
論文題目	Generation of heralded multi-photon parallel state for realizing a large-scale photonic quantum circuit (大規模光量子回路の実現に向けた伝令付き多光子並列状態の生成に関する研究)		
<p>本論文は、光子を用いた量子情報通信処理において重要な、大規模光量子回路の実現に向けた伝令付き多光子並列状態の生成に関する研究について述べたもので、8章からなっている。</p> <p>第1章は序論である。光子を用いた量子技術の研究についての概説、当該分野における本研究の位置付けと目的を明らかにしている。</p> <p>第2章では、本論文に関連する基本的な知識として、単一光子源、伝令付き単一光子源、パラメトリック下方変換過程による光子対発生、光子数分布に関する理論、半透鏡における多光子量子干渉とその多光子多モードへの一般化について述べている。</p> <p>第3章では、パラメトリック下方変換による光子対発生を利用した伝令付き単一光子源で問題となる、複数光子発生確率の抑制の実現が、その実験結果と共に報告されている。複数の光子対発生源を利用し、その何れかの光子対発生を、その一方の光子を光子数識別器により検出により検知した際に、適切に他方の光子を光スイッチにより出力するという方法である。最初にこの方法による複数光子発生確率の低減を理論的に検討し、追ってそれをフェムト秒レーザー励起の光子対源と電気光学素子を利用したスイッチによる実装で実証している。</p> <p>第4章では、伝令付き単一光子源を利用した、光子列の効率的なシリアルパラレル変換について述べている。最初に、従来検討されていた、伝令信号を持たない光子列のシリアルパラレル変換に対して、伝令信号付きの光子列の場合に、その変換効率が光子数に対して指数関数的に向上しうることが理論的に示されている。次に、実際にパラメトリック下方変換光子対源と、その伝令信号列を利用した高速光スイッチによって実装、伝令信号のない光子の変換効率の上限を実超える効率を達成している。</p> <p>第5章では、同じく伝令付き単一光子源を利用した、光子列の効率的なシリアルパラレル変換について、伝令付き単一光子源を複数利用する場合についての拡張が述べられている。複数の伝令付き単一光子源を利用することで、より効率的に、複数の空間モードにパラレルに存在する光子列を生成する方法を発見、実際に2つの光子源を利用した実証実験が報告されている。</p> <p>第6章では、多光子多モード間量子もつれの検証を、量子フーリエ変換を利用して行う方法の提案と実証について述べている。最初に、線形光学素子を用いた空間モード間フーリエ変換回路を利用した、量子もつれ合いの検証の理論について説明され、その後、一方は、3モードに2光子が存在する状態、他方は3モードに1光子が存在する状態の間での量子もつれの検証実験系について、工夫された安定な光学干渉系を利用する方法が述べられている。最後に、3光子での実証が報告されている。</p> <p>第7章では、本論文の成果をまとめ、今後の課題と展望について論じている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、光子を用いた量子情報通信処理において重要な、大規模光量子回路の実現に向けた伝令付き多光子並列状態の生成に関する研究についてまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. 光子を用いた量子情報技術で重要となる光子源に関し、ボトルネックとなっていた、余剰光子の削減に関し重要な成果を得た。特に、伝令付き単一光子源の余剰光子削減について、単一光子源の並列化と、伝令光子のカスケード型光子数識別装置を組み合わせた方法について理論を構築し、それぞれの方法の特徴を明らかにした。さらに、実際にそれらを組み合わせた伝令付き単一光子源を実現、その余剰光子(2光子)生成率を、従来の伝令付き単一光子源の4割強にまで削減することに成功している。

2. さらに、伝令付き単一光子源に対する、シリアルパラレル変換に関し、伝令信号が無い単一光子源のシリアルパラレル変換よりも高い効率を達成できることを理論的に初めて示した。また、実際に2光子の伝令付き単一光子列に対するシリアルパラレル変換を実現、変換効率として、伝令信号がない光子列の最大値である0.5を上回る0.533を達成する事に成功した。

3. さらに、上記の研究をさらに発展させ、複数台の伝令付き単一光子源からの光子を用いて、多光子並列状態を高い効率で実現する方法を独自に提案した。また、2光子に対して提案手法を実現し、2つの伝令付き単一光子源を利用して単純に生成する場合と比較して、1.59倍の効率を実現している。

4. また、多光子が多数モードに存在する状態間の量子もつれ合いを、従来の量子トモグラフィを利用する方法と比較して非常に少ないステップ数で検証する実験にも成功している。これは、光子を用いた量子技術における状態評価を簡便にすると共に、量子情報の基礎理論の観点からも興味深い成果である。

以上、本論文は、光子を用いた量子情報通信処理において重要な、大規模光量子回路の実現に向けた伝令付き多光子並列状態の生成、ならびに多光子量子もつれ状態の新たな評価方法などを実現し、量子光学・量子情報の両分野や光量子通信、量子計測などの応用にも大きく寄与する成果であり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年1月20日、論文内容とそれに関連した事項について諮問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。